

浙江大学



《生物医学传感与检测》实验报告

项目名称：电感式传感器性能测试及其应用

姓 名：

学 号：

学 院： 生物医学工程与仪器科学学院

专 业： 生物医学工程

指导老师： 陈凌翔

2026 年 4 月 13 日

浙江大学 实验报告

课程名称: 生物医学传感与检测 实验类型: 探究型实验 指导老师: 陈凌翔

实验名称: 电感式传感器性能测试及其应用

学 生 一: 学 号: 专 业: 生物医学工程

学 生 二: 学 号: 专 业: 生物医学工程

实验地点: 玉泉教七西裙楼-303 日 期: 2026 年 4 月 13 日

目 录

一、差动变压器式电感传感器的性能	2
1.1 实验目的	2
1.2 实验原理	2
1.3 实验器材	2
1.4 实验步骤	2
1.5 原始实验数据记录	3
1.6 数据处理与分析	3
1.7 问题与讨论	4
二、差动变压器式电感传感器的应用	5
2.1 实验目的	5
2.2 实验原理	5
2.3 实验器材	5
2.4 实验步骤	5
2.5 原始实验数据记录	6
2.6 数据处理与分析	6
2.7 问题与讨论	8
三、实验心得	8

一、差动变压器式电感传感器的性能

1.1 实验目的

了解电感式差动变压器的基本结构及原理；

通过实验验证电感式差动变压器的基本特性。

1.2 实验原理

差动变压器式电感的基本元件有铁芯、初级线圈、次级线圈和线圈骨架等。初级线圈作为差动变压器激励用，相当于变压器的边，而次级线圈由两个结构尺寸和参数相同的线圈反相串接而成，形成变压器的副边。差动变压器是开磁路，工作是建立在互感变化的基础上的。当传感器随着被测体移动时，由于初级线圈和次级线圈之间的互感发生变化，促使次级线圈感应电势产生变化，一只次级感应电势增加，另一只感应电势则减少，将两只次级线圈反向串接（同名端连接），就引出差动输出，其输出电势反映出被测体的移动量。

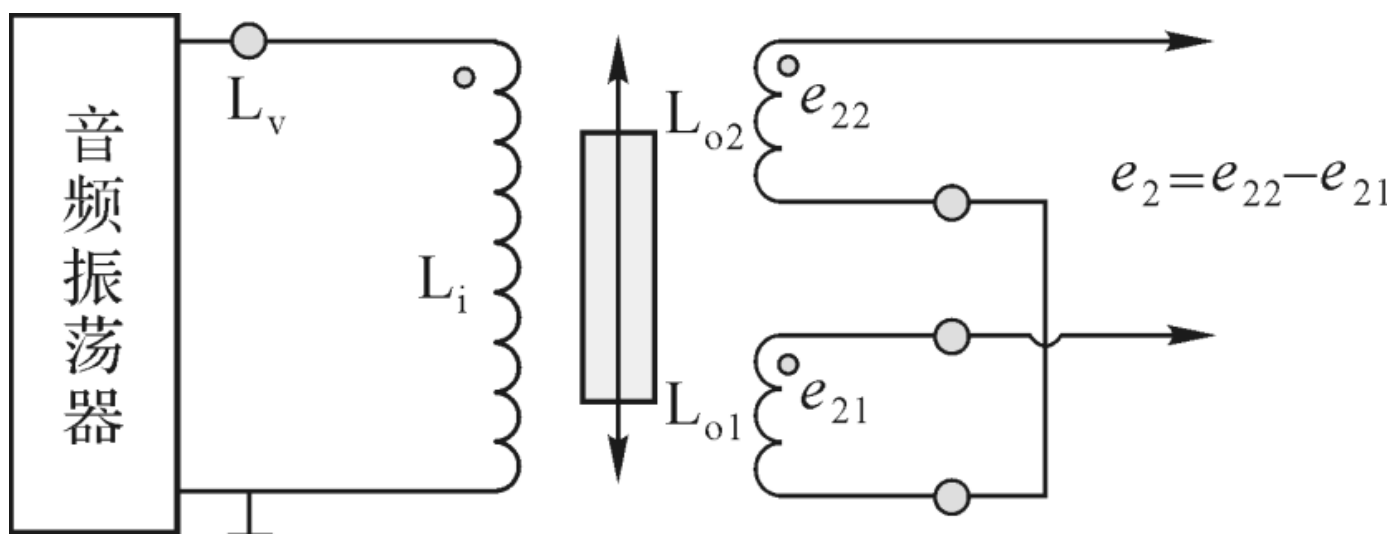


图 1.1 – 电感式差动变压器工作原理

1.3 实验器材

差动变压器、音频振荡器、测微头、示波器

1.4 实验步骤

1. 音频振荡器输出调至频率 5kHz、峰-峰值 4V，用示波器观察初级波形。

2. 根据图接线，将差动变压器、音频振荡器、示波器连接起来，组成一个测量线路。

3. 测微头与圆盘工作台吸合，旋转测微头调节工作台位置，观察次级输出的波形和峰-峰值 VOP-P, 当次级输出最小时，可判定铁芯置于差动变压器上下对称的中间位置，这个最小电压即为零点残余电压，将此位置标记为位移零点。

4. 转动测微头，使振动平台位移 $\pm 5\text{mm}$ ，每次位移 0.5mm，用示波器读出差动变压器输出端的峰峰值填入下表，根据所得数据计算灵敏度 S 。读数过程注意观察初、次级波形的相位关系。

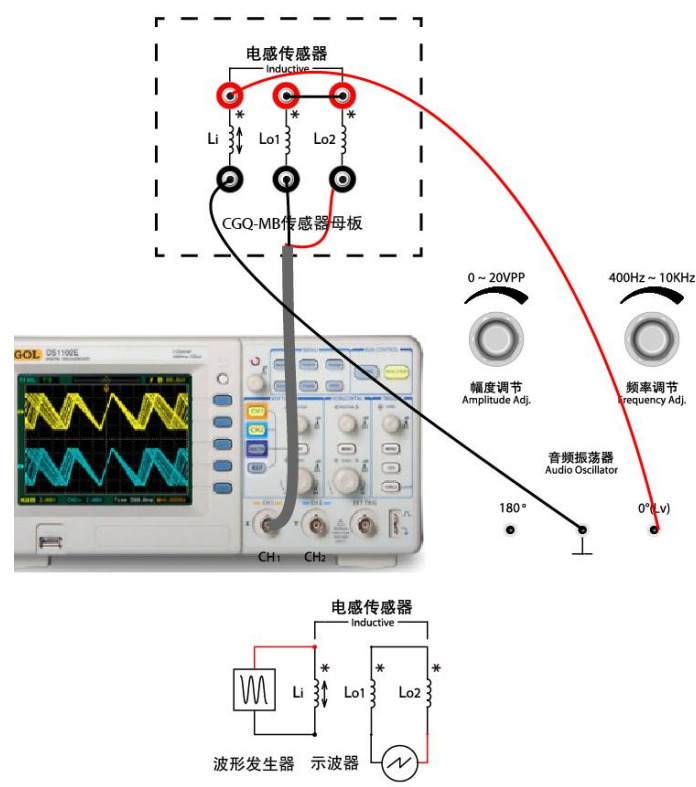


图 1.2 – 接线参考图

1.5 原始实验数据记录

表 1.1 – 差动变压器输出电压峰峰值与位移关系

正向位移 X (mm)	电压 Vopp (mV)	负向位移 X (mm)	电压 Vopp (mV)
0	0	0	0
0.5	88	−0.5	72.8
1.0	172	−1.0	136
1.5	252	−1.5	208
2.0	324	−2.0	276
2.5	400	−2.5	344
3.0	472	−3.0	416
3.5	540	−3.5	484
4.0	620	−4.0	552
4.5	688	−4.5	604
5.0	764	−5.0	668

注：在负向位移 −4.5mm 时观察到初、次级波形波形反相；在正向位移 4.5 mm 时观察到初、次级波形波形同相

1.6 数据处理与分析

1.6.1 初、次级波形的相位关系

在偏离物理零点较远的线性工作区内，可以观察到同相与反相现象。当衔铁向正方向产生较大位移时（如本次实验中观察到的 4.5mm 处），次级输出波形与初级输入波形保持同相；当衔铁向负

方向产生较大位移时（如本次实验中观察到的 -4.5mm 处），次级输出的主导线圈发生对调，波形与初级输入波形呈现反相。

实验中，在位移零点附近观察到了波形变相。

不能仅从输出电压峰峰值可否区分位移方向。因为示波器上读取的交流电压峰峰值反映的仅仅是差动输出信号的幅值绝对大小，它丢失了信号的极性（相位）特征。由实验一测得的 V - X 特性曲线呈“V”字形即可直观看出，当衔铁向物理零点两侧发生等距离位移时，两侧次级线圈产生的差动电动势绝对值是近似相等的。因此，单凭电压表或示波器上的振幅数值，无法判断衔铁是偏向正向还是负向，必须引入相位信息（如实验二中接入相敏检波器），将其转化为带有正负极性的直流电压，才能唯一且准确地确定位移的方向。

1.6.2 实验数据分析处理

使用 MATLAB 绘图得到

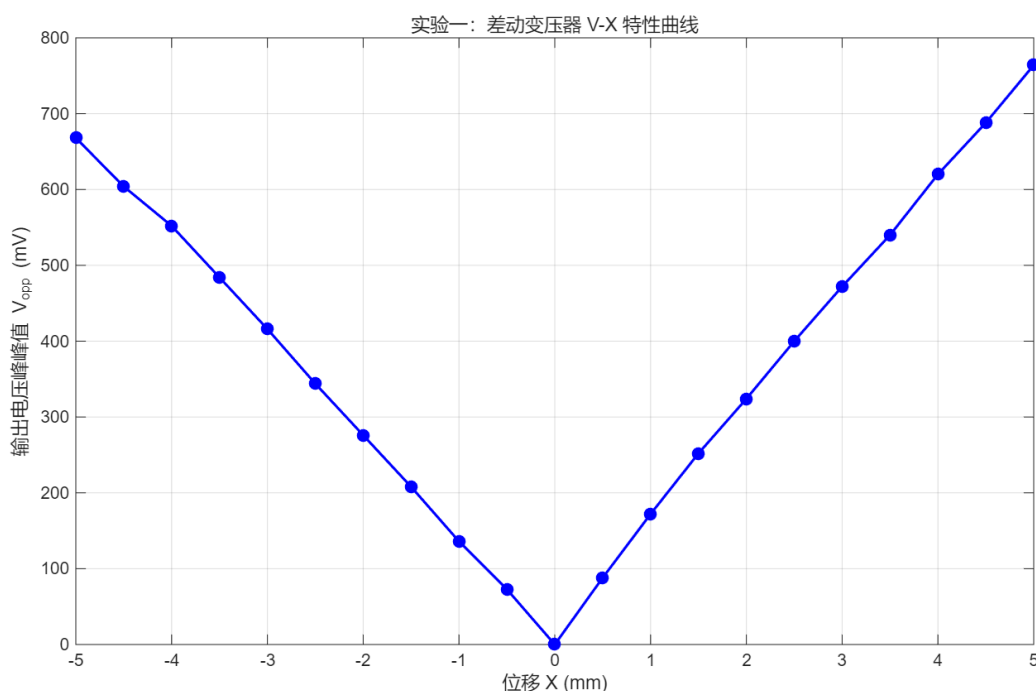


图 1.3 – 差动变压器 V - X 特性曲线

实验测得的 V - X 曲线呈现 V 字形，但两侧并非完全对称。主要原因有以下几点：

- (1) **零点残余电压的影响：** 实验中很难将衔铁绝对精确地调至物理和磁学的绝对中心，导致位移零点存在零点残余电压。这使得曲线的最低点发生了偏移，进而影响了两侧数据的对称性。
- (2) **读数的主观视觉误差：** 实验中使用的示波器在显示交流高频信号时，波形的线迹较粗。在读取 V_{opp} 时，只能依靠光标进行主观估计，这引入了不可避免的视觉读数误差。
- (3) **机械间隙与回程误差：** 测微头在正向和反向旋转时可能存在微小的机械空回间隙；同时，差动变压器内部的两组次级线圈在绕制时，也难以做到电气参数（如电感量、内阻）的绝对 100% 对称。

1.7 问题与讨论

1. 根据实验作出 V - X 关系曲线，指出线性范围，计算灵敏度 $S = \Delta V / \Delta X$ （ ΔV 为电压变化， ΔX 为相应振动平台的位移变化）。

根据数据观察，正向或负向的 $[-5.0\text{mm}, 5.0\text{mm}]$ 范围内，相邻 0.5mm 的电压增量保持在相对稳定的区间，因此线性范围大约为 $\pm 5.0\text{mm}$ 。

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta X} \approx 155 \text{ mV/mm}$$

。

2. 当差动变压器中铁芯的位置由上到下变化时, 示波器观察到的输出波形相位会发生怎样的变化 (与初级线圈的输入波形比较)?

当铁芯位于中间零点位置时, 理论上输出电压为零。当铁芯由上到下跨越中间零点位置时, 输出波形的相位会发生 180 度翻转。在零点一侧时, 输出波形与初级输入波形保持同相 (或具有固定的初相位差); 而在越过零点到达另一侧时, 输出波形会突变为与初级波形反相 (相差 180 度)。这是因为两侧线圈是反向串接的, 互感的主导地位在跨越零点时发生了对调。

二、差动变压器式电感传感器的应用

2.1 实验目的

利用差动变压器式电感传感器测量系统进行位移测量。

2.2 实验原理

测量电路中采用相敏检波器, 使输出电压反映位移方向。相敏检波器要求参考电压与输入电压频率相同、相位相同或相反, 因此在音频振荡器的输出与相敏检波器的参考电压端之间接入移相器。相敏检波器的输出信号经低通滤波器消除高频分量后, 得到与铁芯运动一致的有用信号。电桥中 RW1 和 RW2 用于零点残余电压补偿: 当铁芯位于中间位置时, 由于线圈的不对称性使系统存在零点残余电压, 通过反复调节 RW1 和 RW2 使电路的输出达到最小, 实现零点残余电压补偿的目的。电感传感器测量小位移时, 输出信号过小, 所以要接入放大器。

2.3 实验器材

差动变压器、差动变换 (放大) 器 II、音频振荡器、移相器、相敏检波器、低通滤波器、测微头、示波器、数字电压表 (量程 20V)、低频振荡器、振动台。

差动变换 (放大) 器 II 增益最大。

2.4 实验步骤

1. 旋转测微头, 衔铁置于中间位置 (次级输出最小处)。差动放大器 II 调零。实验接线如图所示。

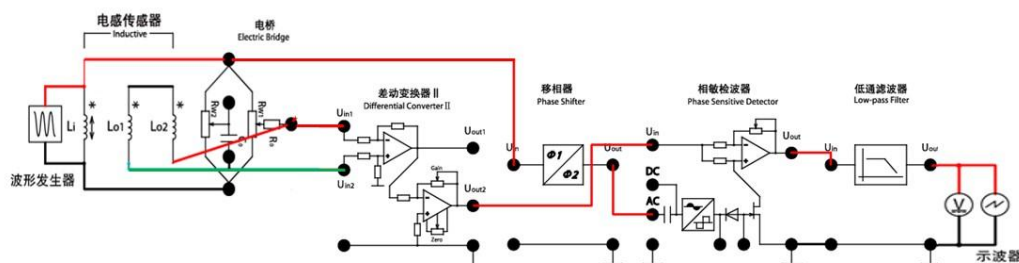


图 2.1 – 接线参考图

2. 音频输出频率 5kHz, 峰-峰值 4V。用示波器两通道同时观察移相器输出波形 (即相敏检波器参考端 AC)、相敏检波器输入波形, 调节“移相”旋钮, 使这两路信号同相或反相。

3. 调节平衡电位器 RW1 和 RW2，使系统输出为零。如无法到零，则需调节测微头微调衔铁的位置。
4. 旋转测微头，带动衔铁±5mm 位移，用数字电压表读取系统的输出电压，每 0.5mm 记录一次读数，填入表格（注意电压值的极性）。
5. 作出电压 U —位移 X 的特性曲线，计算系统的灵敏度和非线性误差。
6. 实验完毕，关闭电源。

2.5 原始实验数据记录

表 2.1 – 系统输出直流电压与位移关系

正向位移 X (mm)	电压 U (V)	负向位移 X (mm)	电压 U (V)
0	−0.004	0	−0.004
0.5	0.370	−0.5	−0.359
1.0	0.740	−1.0	−0.717
1.5	1.110	−1.5	−1.071
2.0	1.481	−2.0	−1.420
2.5	1.845	−2.5	−1.761
3.0	2.18	−3.0	−2.10
3.5	2.54	−3.5	−2.43
4.0	2.89	−4.0	−2.75
4.5	3.25	−4.5	−3.07
5.0	3.59	−5.0	−3.36

注：正负向位移在绝对值为 3.0mm 时切换了电压表量程。

2.6 数据处理与分析

根据原始实验数据，我们采用最小二乘法对绝对位移 $X \in [-5.0, 5.0]$ mm 范围内的电压 U 进行线性拟合。

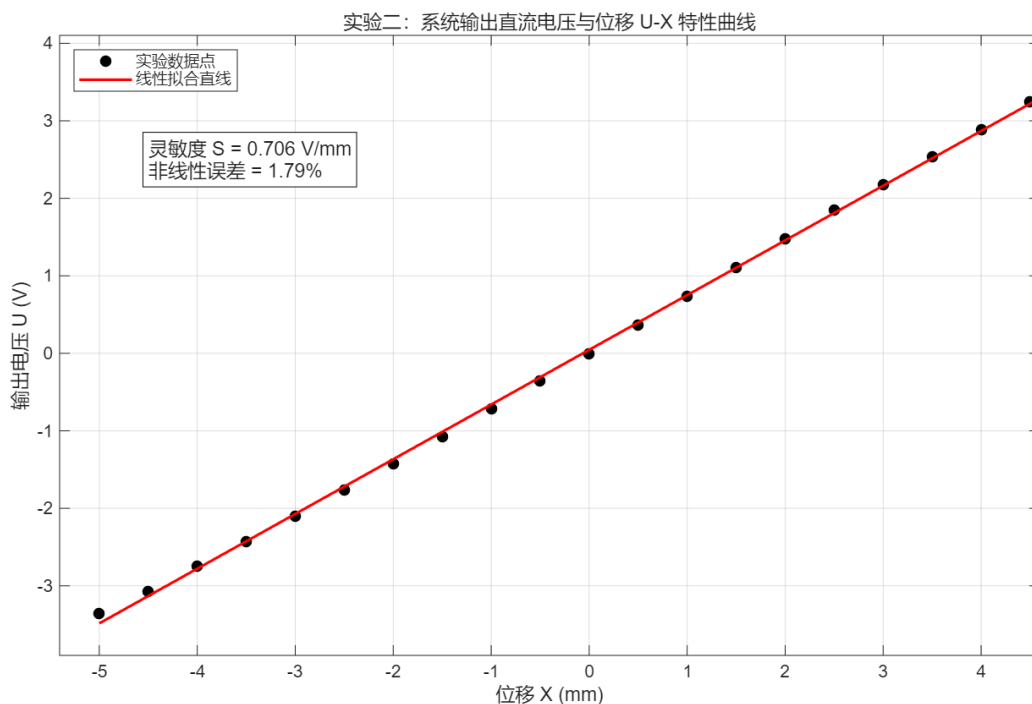


图 2.2 – 实验二 U-X 特性曲线图

2.6.1 灵敏度 S 的计算

灵敏度定义为传感器输出量的增量与输入量增量的比值，即线性拟合直线的斜率。取测量范围的两端数据进行近似计算和采用软件线性拟合两种方法计算灵敏度：

$$S \approx \frac{\Delta U}{\Delta X} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

代入数据：

$$S \approx \frac{3.59 - (-3.36)}{5.0 - (-5.0)} = \frac{6.95}{10.0} = 0.695 \text{ V/mm}$$

若使用 MATLAB 最小二乘拟合，求得的精确灵敏度斜率 S 约为 0.706 V/mm

2.6.2 非线性误差 δ_L 的计算：

非线性误差定义为输出值与拟合直线的最大偏差 $\Delta U_{\max}$ 与传感器满量程输出 Y_{FS} 之比的百分数。

满量程输出 Y_{FS} ：

$$Y_{FS} = U(5.0) - U(-5.0) = 3.59 - (-3.36) = 6.95 \text{ V}$$

最大偏差 $\Delta U_{\max}$ ：将各点位移 X 代入拟合方程 $U_{\text{fit}} = S \cdot X + b$ ，求得理论电压值，并与实际测量值 U 相减取绝对值 $|U - U_{\text{fit}}|$ 。经软件计算比对，找出其中的最大偏差值。

非线性误差计算公式：

$$\delta_L = \frac{\Delta U_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

将 MATLAB 算出的最大偏差代入上式，即可得到最终的非线性误差为 1.79%。

2.7 问题与讨论

通过今天实验，总结简述下差动变压器式电感传感器测位移的原理。

差动变压器式电感传感器的工作是建立在互感变化的基础上的。当初级线圈被交流激励后，随着被测体的移动，铁芯发生位移，导致初级线圈与两个次级线圈之间的互感产生差异：一侧互感增加，另一侧互感减少。因为两个次级线圈是反向串接的，这就会产生一个反映位移量大小的差动交流输出电势。

为了能同时辨别位移的方向并提高信号质量，测量电路中接入了相敏检波器和低通滤波器。相敏检波器利用与输入同频同相（或反相）的参考电压，将交流差动信号转化为带有极性的直流电压输出。最终，输出直流电压的绝对值大小反映了位移的距离，而电压的正负极性则直观地反映了位移的方向。

三、实验心得

通过本次实验，我对差动变压器式电感传感器有了更深入的理解，同时自己的动手实践能力也得到了极大的提升。在之前的理论学习中，我已经了解了差动变压器的工作原理，但通过这次实操，我更加清晰地认识到了其在实际测量中的复杂性与精密性。

首先，在实验操作层面上我感受最深的一点就是示波器极难调整稳定。在读取微小变化的波形时，波形很容易发生跳动。在这个过程中，我求助了很多次老师，在老师的耐心指导下，我才逐渐掌握了如何通过调节触发电平、时间基准和幅度旋钮来锁定波形。必要时，如果实在无法使波形稳定，可以先按下示波器的暂停键，暂停下来后再利用光标测量峰峰值。

其次，实验中的相敏检波技术让我对如何有效消除零点残余电压有了更直观的认识。在没有使用相敏检波器时，差动变压器的输出是无法辨别方向的 V 字形，且受到零点残余电压的干扰。通过接入移相器和相敏检波器调整信号相位，我们成功地将交流信号转换为了带有极性、能反映位移方向的直流直线信号，大大提高了系统的测量精度。这一环节让我意识到，现代传感器不仅仅依赖于物理元件本身的精度，更高度依赖于后端信号处理技术的优化。

另外，实验中对灵敏度和线性范围的探讨，让我认识到传感器的输出信号是受被测物体位移、传感器结构设计和电路参数等多重因素共同决定的。精确的电路调试（如反复调节电桥平衡电位器 R_{W1} 和 R_{W2} ）是确保测量精度的关键。由于传感器极其精密，任何微小的机械回差或调零偏差都会对最终的非线性误差造成不小的影响，这要求我们在科研和实验中必须保持极度严谨和细心的态度。

总的来说，这次实验不仅加深了我对生物医学传感技术的理论认知，更让我掌握了如何通过实验数据分析与实操调节来优化传感器性能的技巧。这些宝贵的经验将对我未来在生物医学工程领域的学习和研究产生积极影响。

这次实验总体还是比较成功的。在此，非常感谢陈凌翔老师在实验过程中给予我的耐心指导与帮助！